

# Modélisation et optimisation du comportement mécanique vibratoire d'une machine de fatigue de torsion

Z. JIANG, O. POLIT, J. PETIT

Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme (LEME), EA4416, Université Paris  
Ouest, 92410 Ville d'Avray

## Résumé

Il y a encore quelques décennies, le modèle de comportement admis pour les métaux face à la fatigue pouvait être représenté par une courbe de Wöhler, courbe qui tendait, après quelques millions de cycles, vers une asymptote horizontale que l'on définit par *limite d'endurance*. Aujourd'hui, grâce à l'arrivée de nouvelles machines de fatigue piezo-électriques, qui travaillent en résonance à très hautes fréquences, on montre que les limites d'endurance établies à quelques millions de cycles deviennent obsolètes. Ces machines permettent d'atteindre aisément le milliard de cycles en moins d'une journée et ainsi, caractériser le comportement en fatigue bien au-delà des présumées limites d'endurance. Ce domaine de la fatigue à très grand nombre de cycles est caractérisé par le terme gigacyclique. Pour des raisons techniques, les travaux en fatigue gigacyclique se sont concentrés jusqu'à maintenant autour des sollicitations en traction-compression. L'objet du présent article est de proposer un système nouveau de fatigue gigacyclique travaillant en cisaillement.

L'étude rapportée ici porte sur la modélisation numérique du comportement mécanique vibratoire du système et son optimisation, dans le but de convenir au plus grand nombre de matériaux, en particulier les aciers et autres alliages métalliques à haute résistance. Une amplitude de torsion suffisante doit donc pouvoir être créée au cours de sollicitations cycliques dans le domaine des fréquences ultrasoniques. Par ailleurs, la fiabilité du système exige que les niveaux de sollicitation dans ce dernier soient les plus faibles possibles. Ainsi, l'objectif est d'atteindre, lors d'essais de fatigue à  $\sim 20$  kHz, le niveau de contrainte le plus élevé possible dans l'éprouvette tout en minimisant les contraintes dans le système.

Le système de fatigue gigacyclique en torsion à l'étude se compose d'un générateur de signaux, d'un convertisseur, d'une sonotrode de traction-compression, d'une sonotrode de torsion et d'une éprouvette réalisée dans le matériau à tester. Pendant la vibration, le générateur produit et envoie une consigne (signal électrique) au convertisseur. Le convertisseur crée alors un déplacement longitudinal de type harmonique à l'entrée de la sonotrode de traction-compression. Une liaison goupille, rendant solidaires les deux sonotrodes, permet de transformer la consigne linéaire en un mouvement de rotation, produisant la vibration de torsion désirée dans la seconde sonotrode puis dans l'éprouvette. La contrainte de cisaillement maximale est ainsi obtenue sur le pourtour de la section centrale de l'éprouvette.

Chaque élément du système est modélisé par la méthode des éléments finis, de même que

l'éprouvette à tester. Tout d'abord, le comportement vibratoire du système est obtenu par des analyses modale et harmonique. Puis, son optimisation est réalisée à travers une étude de sensibilité des paramètres de conception.

La validation du modèle numérique est effectuée en comparant les résultats de l'analyse modale à ceux du modèle (poutre) analytique d'un problème de dynamique vibratoire classique. Il apparaît que plus la courbure des éléments est importante, plus des divergences existent, en termes de fréquence de résonance, entre le modèle éléments finis et le modèle analytique. L'hypothèse émise, qui reste encore à vérifier, serait que des termes différentiels de degré supérieur à deux doivent être pris en compte dans l'équation du mouvement.

Des premiers essais expérimentaux ont pu être confrontés aux résultats des deux analyses. D'une part, ceux-ci confirment les résultats de l'analyse modale sur la valeur de la fréquence propre et la possibilité d'écarter un éventuel couplage entre modes de vibration. D'autre part, un écart relatif constant de près de 30% sur la contrainte de cisaillement maximale dans l'éprouvette a été relevé entre le modèle (résultats issus de l'analyse harmonique) et l'expérience lorsque l'on fait varier l'amplitude de la sollicitation. Plusieurs sources d'incertitudes ont été explorées (collage des jauges de déformation, serrage des différents éléments, ...), la source prédominante semble être la non prise en compte dans le modèle du frottement dans la liaison goupille et à l'interface entre les deux sonotrodes. La modélisation du contact dans l'analyse harmonique n'est pas permise avec le logiciel éléments finis ANSYS à disposition, une alternative est alors basée sur l'introduction d'un amortissement de structure pour simuler ces frottements. En complément, une analyse statique avec contact a permis de montrer que la répartition des contraintes était sensiblement la même que dans l'analyse harmonique.

Ces premiers essais expérimentaux ont également mis en évidence une faiblesse de la machine de fatigue au niveau de la goupille. Pendant la vibration, la goupille subit des contraintes de traction-compression alternées, orientées suivant l'axe de la goupille. Une contrainte radiale moyenne de compression non négligeable se superpose à cet état de contrainte de fonctionnement, elle provient du montage de la goupille avec ajustement sans jeu (précontrainte). C'est donc la contrainte équivalente (différence des deux contraintes principales) qu'il est nécessaire de surveiller pour éviter la ruine du système.

Les solutions suivantes ont été proposées pour améliorer le système existant :

- une modification des dimensions de la sonotrode de torsion et une nouvelle forme d'éprouvette permettent d'augmenter la contrainte de cisaillement dans l'éprouvette,
- un évidement dans les deux sonotrodes, une augmentation du rayon de la goupille et un chanfrein au niveau des alésages prévus pour le logement la goupille dans chaque sonotrode permettent de diminuer la contrainte équivalente, dangereuse, dans la liaison des deux sonotrodes.
- Chacune de ces solutions a été validée numériquement par étude simple de sensibilité. Une étude plus poussée réalisée grâce à l'optimiseur d'ANSYS permettra de trouver les paramètres optimaux garantissant le meilleur compromis entre augmentation de la contrainte de cisaillement dans l'éprouvette et diminution de la contrainte équivalente dans la goupille.

**Mots clefs :** Fatigue Gigacyclique, Torsion, Modélisation Éléments Finis, Analyse Modale, Analyse Harmonique, Comparaison Analytique/Numérique/Expérience.